

Синтез и переработка полимеров и композитов на их основе  
Synthesis and processing of polymers and polymeric composites

УДК 678.072:691.175.664:678.7

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-536-546>

EDN WISPPK



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Исследование влияния сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полиэтилена низкого давления на свойства и структуру резин на основе этиленпропилендиенового каучука

М.Д. Соколова<sup>✉</sup>, А.Р. Халдеева, М.Л. Давыдова, А.Ф. Федорова, Н.В. Шадрин

Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»,  
Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, 677007 Россия

<sup>✉</sup> Автор для переписки, e-mail: marsokol@mail.ru

### Аннотация

**Цели.** Изучение влияния сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и полиэтилена низкого давления (ПЭНД) на комплекс свойств и структуру резин на основе этиленпропилендиенового каучука марки СКЭПТ-50.

**Методы.** Резиновые смеси изготавливали путем предварительного смешения каучука с СВМПЭ и ПЭНД в камере пластикордера BRABENDER PL 2200-3 (Германия) при температуре 160°C в течение 6 мин и скорости вращения роторов 60 об/мин. Полиэтилены вводили в количестве 5, 10 и 15 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. Последующее введение основных ингредиентов резиновой смеси производилось на лабораторных вальцах SYM (Китай) в течение 30 мин при температуре не более 100°C. Вулканизацию образцов проводили в вакуумном гидравлическом прессе Y1000D (Китай) при температуре 185°C в течение 35 мин. Исследование вулканизационных и физико-механических свойств проведено стандартными методами. Исследование надмолекулярной структуры резин проведено с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6840 LV (Япония).

**Результаты.** Показано, что с увеличением содержания ПЭНД и СВМПЭ до 15 мас. ч. твердость резин повышается на 10 и 5 единиц по Шору А соответственно. Коэффициент морозостойкости при –45°C увеличивается, достигая значений 0.229 при введении 10 мас. ч. ПЭНД и 0.260 при введении 15 мас. ч. СВМПЭ. Степень набухания резин в среде тормозной жидкости DOT-4 снижается до 13% у резин с ПЭНД и 19% со СВМПЭ. Исследование стойкости образцов резин к абразивному износу выявило различия в износостойкости в зависимости от вида термопласта: с увеличением содержания ПЭНД объемный износ повышается на 5% и снижается на 45% при увеличении содержания СВМПЭ. Исследования надмолекулярной структуры показали, что при введении СВМПЭ появляются включения разнообразной формы с размерами в пределах 50–100 мкм. Переходная зона между СВМПЭ и каучуком достаточно плавная, трещин и микроразрывов между фазами полимеров, которые могли бы образоваться в процессе низкотемпературного раскалывания, не наблюдается. Это свидетельствует об удовлетворительном межфазном взаимодействии и объясняет повышение стойкости к агрессивной жидкости и абразивному истиранию, а также увеличение коэффициента морозостойкости при растяжении. Образцы резин с ПЭНД по сравнению с исходной резиной имеют более выраженную и рельефную надмолекулярную структуру без видимых включений, что свидетельствует о более равномерном распределении в объеме матрицы за счет высокой текучести расплава ПЭНД.

**Выводы.** Резины, модифицированные СВМПЭ, по сравнению с ПЭНД обладают более высокими показателями износо-, масло- и морозостойкости при сохранении упруго-прочностных показателей. Установлено, что резина, содержащая 15 мас. ч. СВМПЭ, обладает наилучшим комплексом свойств и может быть рекомендована для использования в производстве уплотнительных резинотехнических изделий.

#### Ключевые слова

этиленпропилендиеновый каучук, резина, полиэтилен низкого давления, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, модификация, физико-механические свойства

Поступила: 26.07.2024

Доработана: 09.09.2024

Принята в печать: 18.10.2024

#### Для цитирования

Соколова М.Д., Халдеева А.Р., Давыдова М.Л., Федорова А.Ф., Шадринов Н.В. Исследование влияния сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полиэтилена низкого давления на свойства и структуру резин на основе этиленпропилендиенового каучука. *Тонкие химические технологии*. 2024;19(6):536–546. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-536-546>

#### RESEARCH ARTICLE

# Study of the influence of ultra-high molecular weight polyethylene and high-density polyethylene on the properties and structure of ethylene propylene diene monomer rubber

Marina D. Sokolova✉, Anna R. Khaldeeva, Maria L. Davydova, Aitalina F. Fedorova,  
Nikolay V. Shadrinov

Federal Research Center “The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,”  
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk, 677007 Russia

✉ Corresponding author; e-mail: marsokol@mail.ru

#### Abstract

**Objectives.** The study set out to examine the impact of pre-mixed ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and high-density polyethylene (HDPE) on a range of properties and structural characteristics of SKEPT-50 ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber.

**Methods.** The production of rubber mixtures involved the pre-mixing of rubber with UHMWPE and HDPE in a Brabender PL 2200-3 plasti-corder chamber (Germany) at a temperature of 160°C, for a period of 6 min, and with a rotor speed of 60 rpm. The polyethylene constituents were incorporated into the rubber compound at concentrations of 5, 10, and 15 pts. wt. The subsequent introduction of the principal constituents of the rubber mixture was conducted in an SYM laboratory mill (China) for a period of 30 min at a temperature of no more than 100°C. The vulcanization of the samples was conducted in an Y1000D vacuum hydraulic press (China) at a temperature of 185°C for a period of 35 min. The investigation of vulcanization and physical and mechanical properties was conducted in accordance with the established protocols. The analysis of the rubber supramolecular structure was conducted using a JEOL JSM-6840 LV scanning electron microscope (Japan).

**Results.** The results demonstrate that an increase in the proportion of HDPE and UHMWPE to 15 pts. wt leads to a notable enhancement in the hardness of the rubbers by 10 and 5 Shore A units, respectively. The frost resistance coefficient at –45°C demonstrates an increase with the incorporation of 10 pts. wt of HDPE to reach a value of 0.229, and a further increase with the incorporation of 15 pts. wt of UHMWPE to reach a value of 0.260. The degree of swelling of rubbers in a DOT-4 brake fluid environment is observed to decrease to 13% for rubbers with HDPE and 19% with UHMWPE. The degree of swelling of rubbers in the DOT-4 brake fluid environment is observed to decrease to 13% for rubbers with HDPE and 19% with UHMWPE. While an increase in the HDPE content results in a 5% increase in volumetric wear, an increase in the UHMWPE content is associated with a 45% decrease in volumetric wear. The introduction of UHMWPE was observed to result in the formation of inclusions of varying shapes and sizes within a range of 50–100 μm. The transition zone between UHMWPE and rubber is characterized by a smooth surface. No evidence of cracks or micro-tears between the polymer phases, which could potentially form during low-temperature splitting, was observed. This finding indicates the presence of favorable interfacial interactions, which can be linked to the observed enhancements in resistance to aggressive liquids and abrasion, as well as the improved tensile frost resistance coefficient. The supramolecular structure of rubber samples combined with HDPE is more pronounced and exhibits greater relief than that of the original rubber. This is indicative of a more uniform distribution within the matrix volume, which can be attributed to the high fluidity of the HDPE melt.

**Conclusions.** Rubbers modified with UHMWPE, in comparison with HDPE, exhibit enhanced resistance to wear, oil, and frost, while maintaining their elastic and strength properties. It was established that rubber containing 15 pts. wt of UHMWPE exhibits optimal properties and can thus be recommended for use in sealing rubber products.

## Keywords

ethylene propylene diene monomer rubber, rubber, high-density polyethylene, ultra-high molecular weight polyethylene, modification, physical and mechanical properties

Submitted: 26.07.2024

Revised: 09.09.2024

Accepted: 18.10.2024

## For citation

Sokolova M.D., Khaldeeva A.R., Davydova M.L., Fedorova A.F., Shadrinov N.V. Study of the influence of ultra-high molecular weight polyethylene and high-density polyethylene on the properties and structure of ethylene propylene diene monomer rubber. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2024;19(6):536–546. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-536-546>

## ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением в развитии химии и технологии эластомеров в настоящее время остается модификация каучуков и резин различными добавками с целью получения эластомерных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками и расширения областей их применения. Одним из эффективных способов модификации свойств резин является метод совмещения каучуков с термопластичными полимерами (полиэтиленом, полипропиленом, поливинилхлоридом и т.д.). Перспективность применения термопластичных полимеров в качестве модифицирующих добавок каучуков и резин показана в исследованиях многих авторов [1–4]. Несмотря на это, задача продолжает оставаться актуальной и представляет как научный, так и практический интерес благодаря развитию технологий получения новых видов термопластов и каучуков и возможности получения материалов с заданными свойствами.

Как известно [1, 3], улучшение определенных свойств материалов при модификации достигается при высоком уровне взаимодействия на границе раздела фаз эластомер–наполнитель, т.е. тогда, когда в ней образуется развитый переходный слой. Основным условием образования развитого переходного слоя является совместимость полимеров. Однако найти совместимую пару каучука и полимера, достичь хорошего распределения и уровня взаимодействия на границе раздела фаз двух высокомолекулярных компонентов является весьма трудной задачей.

Благодаря химической стойкости, высокой прочности, работоспособности в широком диапазоне температур, озоно-, тепло-, атмосферо- и морозостойкости, а также доступности на рынке и относительно низкой стоимости [5–8] при разработке морозостойких резин, работоспособных в условиях воздействия агрессивных сред, особый интерес вызывают этиленпропилендиеновые каучуки (СКЭПТ<sup>1</sup>). СКЭПТ представляет собой аморфный и неполярный каучук,

что обеспечивает его некоторое сходство с близкими по полярности и параметрам растворимости термопластичными полиолефинами [7].

В связи с этим, целью работы является изучение влияния сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и полиэтилена низкого давления (ПЭНД) на комплекс свойств и структуру резин на основе этиленпропилендиенового каучука марки СКЭПТ-50. Выбор обусловлен тем, что СВМПЭ имеет меньшую степень кристалличности, отличается большой длиной макромолекул и малой разветвленностью, высокой прочностью, износ-, морозостойкостью, стойкостью к ударным нагрузкам, низким коэффициентом трения [9–11]. В свою очередь, ПЭНД обладает высокой плотностью, твердостью и жесткостью. Важным является то, что плавление ПЭНД и СВМПЭ происходит в том же температурном диапазоне, что и процесс вулканизации СКЭПТ (130–150°C) [1].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основы резиновых смесей использовали тройной этиленпропилендиеновый каучук марки СКЭПТ-50 производства ПАО «Уфаоргсинтез» (Россия) с массовыми долями пропиленовых звеньев 42–50% и дициклопентадиеновых звеньев 5.8–7.2% (ТУ 2294-087-05766563-2010). В качестве модифицирующих добавок выбраны СВМПЭ марки GUR 4113 со средневязкостной молекулярной массой  $3.9 \cdot 10^6$  г/моль производства *Celanese* (Германия) и ПЭНД марки 273-83 со средневязкостной молекулярной массой  $0.5 \cdot 10^6$  г/моль производства ПАО «Казаньоргсинтез» (Россия). Полиэтилены вводили в количестве 5, 10 и 15 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. Рецептуры резиновых смесей на основе СКЭПТ-50 представлены в табл. 1. Для получения резиновых смесей также использовали следующие ингредиенты: технический углерод марки N550 производства АО «Ивановский техуглерод и резина» (Россия) (CAS № 1333-86-4), оксид цинка производства ООО Челябинский химический завод

<sup>1</sup> СКЭПТ — синтетический каучук этилен-пропиленовый тройной.

**Таблица 1.** Рецептура резиновых смесей на основе СКЭПТ-50

**Table 1.** Formulation of rubber compounds based on SKEPT-50

№	Ингредиенты Ingredients	Мас. ч. на 100 мас. ч. каучука Weight parts per 100 weight parts of rubber						
		1	2	3	4	5	6	7
1	СКЭПТ-50 SKEPT-50	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2	ПЭНД 273-83 HDPE 273-83	–	5.0	–	10.0	–	15.0	–
3	СВМПЭ GUR 4113 UHMWPE GUR 4113	–	–	5.0	–	10.0	–	15.0
4	Технический углерод N550 Carbon black N550	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
5	Оксид цинка Zinc oxide	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
6	Стеариновая кислота Stearic acid	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
7	Альтакс Altax	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
8	Сера Sulfur	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

«ОКСИД» (Россия) (CAS № 1314-13-2), стеариновую кислоту производства ООО «Компонент-Реактив» (Россия) (CAS № 57-11-4), альтакс производства Ningbo Actmix Rubber Chemicals Co. (Китай) (CAS № 120-78-5) и серу производства ООО «Каспийгаз» (Россия) (CAS № 7704-34-9).

Резиновые смеси (2–7) изготовлены с предварительным смешением каучука с СВМПЭ и ПЭНД в камере пластикордера BRABENDER PL 2200-3 (Brabender, Германия) при температуре 160°C в течение 6 мин и скорости вращения роторов 60 об/мин. Последующее введение основных ингредиентов резиновой смеси производилось на лабораторных вальцах SYM (Yi Tzung, Китай) в течение 30 мин при температуре не более 100°C. Вулканизацию образцов проводили в вакуумном гидравлическом

прессе Y1000D (Tung Yu, Китай) при температуре 185°C в течение 35 мин. Оптимальную температуру и продолжительность вулканизации резиновых смесей подбирали по результатам исследований вулканизационных характеристик.

Вулканизационные характеристики резиновых смесей определялись на безроторном анализаторе перерабатываемости резин RPA 2000 фирмы Alpha Technologies (США) при температуре 185°C, частоте 1.7 Гц и амплитуде деформации 0.5° в течение 50 мин в соответствии с ГОСТ Р 54547-2011<sup>2</sup>. Определение физико-механических показателей, а также исследование морозостойкости при растяжении проведены на испытательной машине UTS-20K (UTS Testsysteme, Германия) согласно ГОСТ 270-75<sup>3</sup> и ГОСТ 408-78<sup>4</sup> соответственно. Стойкость

<sup>2</sup> ГОСТ Р 54547-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Смесей резиновые. Определение вулканизационных характеристик с использованием безроторных реометров. М.: Стандартинформ; 2018 г. [GOST R 54547-2011. National Standard of the Russian Federation. Rubber compounds. Measurement of vulcanization characteristics with the rotorless cure meters. Moscow: Standartinform; 2018.]

<sup>3</sup> ГОСТ 270-75. Межгосударственный стандарт. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. М.: Стандартинформ; 2008 г. [GOST 270-75. Interstate Standard. Rubber. Method of the determination elastic and tensile stress-strain properties. Moscow: Standartinform; 2008.]

<sup>4</sup> ГОСТ 408-78. Государственный стандарт Союза СССР. Резина. Методы определения морозостойкости при растяжении. М.: Издательство стандартов; 1985 г. [GOST 408-78. State Standard of the USSR. Rubber. Methods for determination of low temperature resistance at extension. Moscow: Izdatelstvo standartov; 1985.]

к старению под воздействием статической деформации сжатия определяли по ГОСТ 9.029-74<sup>5</sup> при 20% сжатии и температуре 100°C. Износостойкость резин оценивали по методу определения сопротивления истиранию в соответствии с ГОСТ 23509-79<sup>6</sup> на машине трения AP-40 (Compart, Россия). Твердость по Шору А определяли по ГОСТ 263-75<sup>7</sup>. Степень набухания вулканизатов в среде тормозной жидкости DOT-4 (LUXE, Россия), определяли согласно ГОСТ 9.030-74<sup>8</sup>. Исследование надмолекулярной структуры резин проведено с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6840 LV (JEOL, Япония) на низкотемпературных сколах обрывков резин.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вулканизационные характеристики резиновых смесей на основе СКЭПТ-50 приведены в табл. 2.

Изучение кинетики вулканизации резиновых смесей показало, что введение модифицирующих добавок приводит к снижению максимального крутящего момента ( $S'_{\text{макс}}$ ) по сравнению с исходной смесью. Увеличение содержания ПЭНД до 15 мас. ч. приводит к уменьшению  $S'_{\text{макс}}$  на 29%, а увеличение содержания СВМПЭ снижает его на 11%. Введение ПЭНД приводит к постепенному снижению минимального крутящего момента ( $S'_{\text{мин}}$ ), что свидетельствует об уменьшении вязкости резиновых смесей [12–13] за счет повышенной текучести расплава, а введение СВМПЭ, наоборот, к повышению вязкости резиновых смесей. Это связано с тем, что вследствие большой длины полимерных цепей, СВМПЭ при нагревании не переходит в вязкотекучее состояние, а только в высокоэластическое [2, 14]. Разница между максимальным и минимальным крутящими моментами ( $S'_{\text{макс}} - S'_{\text{мин}}$ ) характеризует густоту сшивки в резине [15–16]. Максимальный показатель густоты сшивки отмечается у исходной смеси. Наименьшей разницей характеризуются резиновые

смеси, содержащие ПЭНД. Такое поведение резин, наполненных ПЭНД, можно объяснить лучшим распределением ПЭНД в эластомерной матрице, которое реализуется при высокотемпературном смешении каучука с порошком ПЭНД благодаря высокой текучести его расплава и приводит к проявлению экранирующего эффекта макромолекул каучука от серной вулканизирующей системы [2]. С увеличением концентрации ПЭНД этот эффект усиливается, тем самым уменьшая густоту сшивки. В свою очередь, СВМПЭ, находясь в объеме матрицы в виде микрообъемов, также локально препятствует процессу сшивки макромолекул каучука через серные мостики, что также приводит к некоторому снижению  $S'_{\text{макс}} - S'_{\text{мин}}$  по сравнению с исходной резиной. Введение исследованных термопластов в обоих случаях приводит к увеличению времени нахождения смесей в вязкотекучем состоянии ( $T_5$ ) и скорости вулканизации ( $R_V$ ), сокращая время достижения оптимума вулканизации ( $T_{90}$ ).

В табл. 3 представлены физико-механические и низкотемпературные характеристики вулканизатов на основе СКЭПТ-50.

Исследование физико-механических свойств резин показало, что с введением полиэтиленов и с увеличением их содержания повышаются условное напряжение при 100% удлинении ( $f_{100}$ ) и твердость по Шору А ( $H$ ) вулканизатов. По сравнению с исходной резиной, у резин с 15 мас. ч. ПЭНД и СВМПЭ значения  $f_{100}$  увеличиваются в 1.4 раза, а твердость по Шору А на 10 и 5 единиц соответственно. При этом значения условной прочности при растяжении ( $f_p$ ) и относительного удлинения при разрыве ( $\epsilon_p$ ) остаются практически на одном уровне с исходной резиной.

Исследования низкотемпературных характеристик вулканизатов показали, что максимальными значениями коэффициента морозостойкости ( $K_M$ ) при  $-45^\circ\text{C}$  обладают резины, содержащие СВМПЭ, причем, чем выше его содержание, тем больше

<sup>5</sup> ГОСТ 9.029-74. Государственный стандарт Союза СССР. Единая система защиты от коррозии и старения. Резины. Методы испытаний на стойкость к старению при статической деформации сжатия. М.: Издательство стандартов; 1982 г. [GOST 9.029-74. State Standard of the USSR. Unified system of corrosion and ageing protection. Vulcanized rubbers. Method of testing of resistance to ageing under static deformation of compression. Moscow: Izdatelstvo standartov; 1982.]

<sup>6</sup> ГОСТ 23509-79. Межгосударственный стандарт. Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении по возобновляемой поверхности. М.: ИПК Издательство стандартов; 2001 г. [GOST 23509-79. Interstate Standard. Rubber. Method for the determination of abrasion resistance under slipping a renewing surface. Moscow; IPK Izdatelstvo standartov; 2001.]

<sup>7</sup> ГОСТ 263-75. Государственный стандарт Союза СССР. Резина. Метод определения твердости по Шору А. М.: Издательство стандартов; 1989 г. [GOST 263-75. GOST 9.029-74. State Standard of the USSR. Rubber. Method for the determination of Shore A hardness. Moscow: Izdatelstvo standartov; 1989.]

<sup>8</sup> ГОСТ 9.030-74. Межгосударственный стандарт. Единая система защиты от коррозии и старения. Резины. Методы испытаний на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред. М.: Стандартинформ; 2003 г. [GOST 9.030-74. Interstate Standard. Unified system of corrosion and ageing protection. Vulcanized rubbers. Method of testing of resistance to attack by corrosive media in limp state. Moscow: Standartinform; 2003.]

**Таблица 2.** Вулканизационные характеристики резиновых смесей

**Table 2.** Vulcanization characteristics of rubber compounds

№ No.	Показатели Properties	Исх. резина Original rubber	5 мас. ч. 5 pts. wt		10 мас. ч. 10 pts. wt		15 мас. ч. 15 pts. wt	
			ПЭНД HDPE	СВМПЭ UHMWPE	ПЭНД HDPE	СВМПЭ UHMWPE	ПЭНД HDPE	СВМПЭ UHMWPE
			1	2	3	4	5	6
1	$S'_{\max}$ , дН·м $S'_{\max}$ , dN·m	15.48	13.46	14.15	11.89	13.78	11.06	14.03
2	$S'_{\min}$ , дН·м $S'_{\min}$ , dN·m	1.29	1.11	1.26	1.01	1.33	0.98	1.44
3	$S'_{\max} - S'_{\min}$ , дН·м $S'_{\max} - S'_{\min}$ , dN·m	14.19	12.35	12.89	10.88	12.43	10.08	12.59
4	$T_5$ , мин $T_5$ , min	2.13	2.24	2.24	2.28	2.23	2.28	2.22
5	$T_{90}$ , мин $T_{90}$ , min	18.78	17.74	17.49	18.13	17.80	18.58	18.38
6	$R_V$ , мин <sup>-1</sup> $R_V$ , min <sup>-1</sup>	6.01	6.45	6.56	6.31	6.42	6.13	6.19

*Примечание:*  $S'_{\max}$  — максимальный крутящий момент;  $S'_{\min}$  — минимальный крутящий момент;  $S'_{\max} - S'_{\min}$  — разница крутящих моментов;  $T_5$  — время начала подвулканизации;  $T_{90}$  — время достижения оптимума вулканизации;  $R_V$  — скорость вулканизации.

*Note:*  $S'_{\max}$  is the maximum torque;  $S'_{\min}$  is the minimum torque;  $S'_{\max} - S'_{\min}$  is the torque difference;  $T_5$  is the time of onset of scorching;  $T_{90}$  is the time to achieve optimum vulcanization;  $R_V$  is the vulcanization rate.

значение  $K_M$ . Это объясняется тем, что по сравнению с ПЭНД, СВМПЭ имеет более развитую аморфную область, которая имеет переплетения длинных макромолекул и проходные макромолекулы (соединяющие кристаллиты), это придает материалу высокую эластичность и морозостойкость. Поэтому, вероятнее всего, при низких температурах, когда макромолекулы каучука теряют свою гибкость, вклад в морозостойкость вносит аморфная фаза СВМПЭ [17]. Резины с ПЭНД (2, 6) имеют коэффициент морозостойкости при растяжении ниже 0.20, что свидетельствует о недостаточной морозостойкости резин при данной температуре.

Известно [18], что стойкость резин к агрессивным средам определяется, прежде всего, природой каучука. Вместе с тем, существенное влияние на поведение резин в агрессивных средах оказывают компоненты, входящие в состав резин. СКЭПТ, благодаря своей химической природе, обладает высокой стойкостью к действию полярных сред, низкой стойкостью к алифатическим, ароматическим и неполярным растворителям [7, 19]. В связи с этим, для оценки стойкости резин к агрессивным средам была выбрана тормозная жидкость на полярной

гликолевой основе DOT-4 Arctic Extreme производства LUXE (Россия), предназначенная для использования в гидроприводах тормозов и сцеплений автомобилей с дисковыми и барабанными системами торможения. Результаты исследования показали, что все резины составов 1–7 в среде DOT-4 проявляют высокую стойкость. С увеличением концентрации полиэтиленов, несмотря на низкую степень сшивки, степень набухания резин снижается до 13% у резин с ПЭНД и 19% со СВМПЭ. Вероятно, снижению степени набухания способствуют высокие молекулярные массы полимеров.

Важной характеристикой, позволяющей оценить релаксационные свойства и уплотнительную способность резин, является остаточная деформация после сжатия (ОДС). У резин 2–7, за исключением резины 3, значения ОДС находятся на уровне исходной резины. А у резины 3, содержащей 5 мас. ч. СВМПЭ, наблюдается снижение ОДС до 37%.

Одним из путей снижения износа резин и повышения работоспособности является увеличение сопротивления истиранию. На рис. 1 приведены результаты определения сопротивления истиранию исследуемых резин.

Таблица 3. Свойства вулканизатов на основе СКЭПТ-50

Table 3. Properties of vulcanizates based on SKEPT-50

№	Показатели Properties	Исх. резина Original rubber	5 мас. ч. 5 pts. wt		10 мас. ч. 10 pts. wt		15 мас. ч. 15 pts. wt	
			ПЭНД HDPE	СВМПЭ UHMWPE	ПЭНД HDPE	СВМПЭ UHMWPE	ПЭНД HDPE	СВМПЭ UHMWPE
			1	2	3	4	5	6
1	$f_p$ , МПа $f_{st}$ , МПа	18.1	17.5	18.9	17.7	16.8	19.6	18.6
2	$f_{100}$ , МПа $f_{100}$ , МПа	2.8	3.2	3.0	3.3	3.3	3.8	3.8
3	$\epsilon_p$ , % $\epsilon_e$ , %	516	492	528	496	466	585	487
4	$K_M$ при $-45^\circ\text{C}$ $K_{\text{frost}}$ at $-45^\circ\text{C}$	0.240	0.199	0.230	0.229	0.247	0.173	0.260
5	$H$ , ед. Шор А $H$ , Shore A scale	62	65	63	67	66	72	67
6	ОДС ( $100^\circ\text{C} \times 24$ ч), % RRCS ( $100^\circ\text{C} \times 24$ h), %	52	51	37	54	53	51	51
7	$\Delta M$ в среде DOT-4 ( $100^\circ\text{C} \times 72$ ч), % $\Delta M$ in DOT-4 ( $100^\circ\text{C} \times 72$ h), %	1.78	1.61	1.71	1.60	1.58	1.55	1.43

Примечание:  $f_p$  — условная прочность при растяжении;  $f_{100}$  — условное напряжение при 100% удлинении;  $\epsilon_p$  — относительное удлинение при разрыве;  $K_M$  — коэффициент морозостойкости при растяжении;  $H$  — твердость по Шору А; ОДС — относительная остаточная деформация сжатия при 20% сжатии;  $\Delta M$  — степень набухания.

Note:  $f_{st}$  is the conditional tensile strength;  $f_{100}$  is the conditional stress at 100% elongation;  $\epsilon_e$  is the relative elongation at break;  $K_{\text{frost}}$  is the coefficient of frost resistance during tension;  $H$  is the Shore A hardness; RRCS is the relative residual compressive strain at 20% compression;  $\Delta M$  is the degree of swelling.

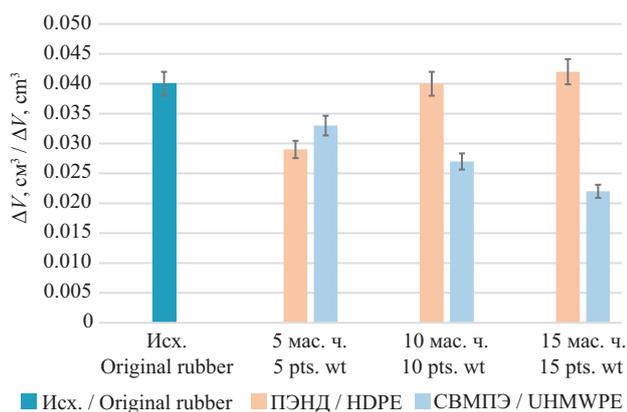


Рис. 1. Объемный износ резины при абразивном истирании

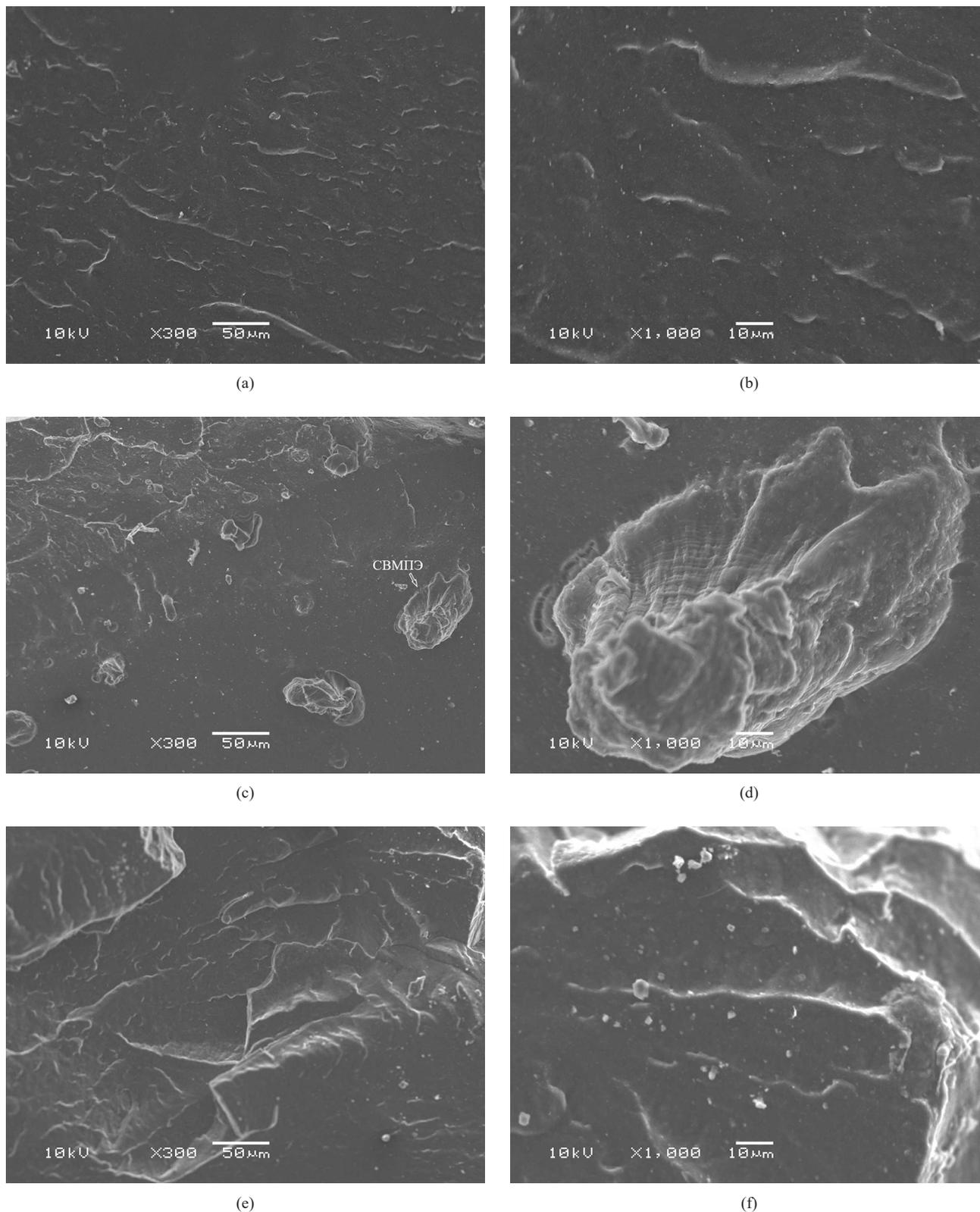
Fig. 1. Volumetric wear of rubber due to abrasive abrasion

Исследование стойкости образцов резины к абразивному износу выявило различия в износостойкости в зависимости от вида полиэтилена. При добавлении по 5 мас. ч. ПЭНД и СВМПЭ в СКЭПТ объемный износ уменьшается примерно на 28 и

18% соответственно по сравнению с исходной резиной. Далее, с увеличением содержания ПЭНД объемный износ увеличивается, что, возможно, связано с уменьшением плотности шивки резины при введении ПЭНД. Увеличение содержания СВМПЭ положительно влияет на износостойкость резины. При введении 15 мас. ч. объемный износ снижается на 45%. Скорее всего, это объясняется высокими триботехническими свойствами самого СВМПЭ.

Микрофотографии низкотемпературных сколов резины, содержащих модифицирующие полиэтиленовые добавки, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6840 LV, представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что исходная резина изначально имеет однородную структуру (рис. 2а, 2б). После введения СВМПЭ появляются включения разнообразной формы с размерами в пределах 50–100 мкм (рис. 2с, 2д). Видно, что у образцов, содержащих СВМПЭ, переходная зона между СВМПЭ и каучуком достаточно плавная, трещин и микроразрывов



**Рис. 2.** Микрофотографии резин на основе СКЭПТ-50 (а, б); СКЭПТ-50 + 15 мас. ч. СВМПЭ (с, д); СКЭПТ-50 + 15 мас. ч. ПЭНД (е, ф) при увеличениях 300× (слева) и 1000× (справа)

**Fig. 2.** Microphotographs of rubber based on SKEPT-50 (a, b); SKEPT-50 + 15 pts. wt of UHMWPE (c, d); SKEPT-50 + 15 pts. wt of HDPE (e, f) at magnifications 300× (left) and 1000× (right)

между фазами полимеров, которые могли бы образоваться в процессе низкотемпературного расквашивания, не наблюдается. Это свидетельствует об удовлетворительном межфазном взаимодействии и объясняет повышение стойкости к агрессивной жидкости и абразивному истиранию, а также увеличение коэффициента морозостойкости при растяжении [2]. Образцы резин с ПЭНД (рис. 2е, 2ф) по сравнению с исходной резиной имеют более выраженную и рельефную надмолекулярную структуру без видимых включений, как у образцов с СВМПЭ, что свидетельствует о более равномерном распределении в объеме матрицы за счет высокой текучести расплава ПЭНД.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена сравнительная оценка влияния ПЭНД марки 273-83 и СВМПЭ GUR 4113 на комплекс технических свойств резин на основе СКЭПТ-50. Резины, модифицированные СВМПЭ, по сравнению с ПЭНД, обладают более высокими показателями износо-, масло- и морозостойкости при сохранении упруго-прочностных показателей благодаря удовлетворительному межфазному взаимодействию между СВМПЭ и каучуком. Установлено, что резина, содержащая 15 мас. ч. СВМПЭ, обладает наилучшим комплексом свойств и может быть рекомендована для использования в производстве уплотнительных резинотехнических изделий. Таким образом, показана перспективность применения СВМПЭ и ПЭНД в качестве модифицирующих добавок для повышения эксплуатационных характеристик резин на основе этиленпропилендиенового каучука.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Главы Республики Саха (Якутия) молодым

ученым, специалистам и студентам Республики Саха (Якутия) (Соглашение № 02/1038) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».

## Acknowledgments

The research was supported by the Head of the Republic of Sakha (Yakutia) (Agreement No. 02/1038) using the scientific equipment of the Center for Collective Use of the Federal Research Center “Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.”

## Вклад авторов

**М.Д. Соколова** — руководство и научное консультирование, правка финальной версии статьи.

**А.Р. Халдеева** — проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных данных, написание текста статьи, подготовка материалов к публикации.

**М.Л. Давыдова** — обработка и анализ полученных данных, редактирование текста статьи.

**А.Ф. Федорова** — обработка и анализ полученных данных, редактирование текста статьи.

**Н.В. Шадрин** — руководство на всех этапах работы, редактирование текста статьи.

## Authors' contributions

**M.D. Sokolova** — guidance and scientific consulting, editing the release version of the article.

**A.R. Khaldeeva** — conducting experimental studies, processing and analyzing the data obtained, writing the text of the article, and preparing materials for publication.

**M.L. Davydova** — processing and analysis of the obtained data, editing the article text.

**A.F. Fedorova** — processing and analysis of the data obtained, editing the text of the article.

**N.V. Shadrinov** — management at all stages of work, editing the article text.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflicts of interest.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аммосова О.А., Аргунова А.Г., Ботвин Г.В. и др. *Модифицированные полимерные и композиционные материалы для северных условий*. Новосибирск: Наука; 2017. 217 с. ISBN 978-5-7692-1527-8
- Шадрин Н.В., Федорова А.Ф., Гоголев В.Д. Сравнительный анализ влияния ПЭНД и СВМПЭ на свойства бутадиен-нитрильной резины. *Химическая технология*. 2024;25(1):8–14. <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2024-25-1-8-14>

## REFERENCES

- Ammosova O.A., Argunova A.G., Botvin G.V. et al. *Modifitsirovannye polimernye i kompozitsionnye materialy dlya severnykh uslovii (Modified Polymer and Composite Materials for Northern Conditions)*. Novosibirsk: Nauka; 2017. 217 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7692-1527-8
- Shadrinov N.V., Fedorova A.F., Gogolev V.D. Comparative analysis of effect of HDPE and UHMWPE on properties of nitrile butadiene rubber. *Khimicheskaya Tekhnologiya = Chemical Technology*. 2024;25(1):8–14 (in Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2024-25-1-8-14>

3. Шварц А.Г., Динзбург Б.Н. *Совмещение каучуков с пластиками и синтетическими смолами*. М.: Химия; 1972. 224 с.
4. Чернышев С.В., Люсова Л.Р., Махмудова С.Р., Жарылганова М.Б., Коняева Л.А. Влияние полиэтилена высокой плотности на свойства эластомерных материалов из синтетического полиизопрена. *Каучук и резина*. 2023;82(5):242–247. <https://doi.org/10.47664/0022-9466-2023-82-5-242-247>
5. Семенова С.Н., Чайкун А.М., Сулейманов Р.Р. Этиленпропилендиеновый каучук и его применение в резинотехнических материалах специального назначения. *Авиационные материалы и технологии*. 2019;56(3):23–30. <http://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-3-23-30>
6. Lee S.-H., Park G.-W., Kim H.-J., Chung K., Jang K.-S. Effects of Filler Functionalization on Filler-Embedded Natural Rubber/Ethylene-Propylene-Diene Monomer Composites. *Polymers*. 2022;14(17):3502. <https://doi.org/10.3390/polym14173502>
7. Каблов Е.Н., Семенова С.Н., Сулейманов Р.Р., Чайкун А.М. Перспективы применения этиленпропилендиенового каучука в составе морозостойкой резины. *Труды ВИАМ*. 2019;84(12):29–36. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-12-29-36>
8. Елисеев О.А., Чайкун А.М., Бузник В.М., Соколова М.Д., Попов С.Н. Основные принципы построения рецептур морозостойких резин для изделий, эксплуатируемых в условиях арктического климата. *Перспективные материалы*. 2015;11:5–18.
9. Валуева М.И., Железина Г.Ф., Гуляев И.Н. Полимерные композиционные материалы повышенной износостойкости на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2017;6:23–29.
10. Samad M.A. Recent Advances in UHMWPE/UHMWPE Nanocomposite/UHMWPE Hybrid Nanocomposite Polymer Coatings for Tribological Applications: A Comprehensive Review. *Polymers*. 2021;13(4):608. <https://doi.org/10.3390/polym13040608>
11. Yue Q., Gao R., Song Z., Gou Q. Recent Advancements in the Synthesis of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene via Late Transition Metal Catalysts. *Polymers*. 2024;16(12):1688. <https://doi.org/10.3390/polym16121688>
12. Yahaya L.E., Adebawale K.O., Olu-Owolabi B.I. Cure characteristics and rheological properties of modified kaolin-natural rubber composites. *Am. Chem. Sci. J.* 2014;4(4): 472–480. <http://doi.org/10.9734/ACSJ/2014/6575>
13. Шадрин Н.В., Борисова А.А., Халдеева А.Р., Антоев К.П. Влияние технологического режима смешения и вулканизирующей системы на свойства композиций на основе бутадиен-нитрильного каучука и сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Перспективные материалы*. 2023;2:77–86. <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2023-2-77-86>
14. Белокурова А.П., Агеева Т.А. *Химия и технология получения полиолефинов*. Иваново: Иван.гос. хим.-технол. ун-т.; 2011. 126 с. ISBN 978-5-9616-0399-4
15. Новаков И.А., Вольфсон С.И., Новопольцева О.М., Кракшин М.А. *Реологические и вулканизационные свойства эластомерных композиций*. М.: ИКЦ «Академкнига»; 2006. 332 с. ISBN 5-94628-296-4
16. López-Manchado M.A., Arroyo M., Herrero B., Biagiotti J. Vulcanization kinetics of natural rubber-organoclay nanocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.* 2003;89(1):1–15. <https://doi.org/10.1002/app.12082>
3. Shvarts A.G., Dinzbarg B.N. *Sovmeshchenie kauchukov s plastikami i sinteticheskimi smolami (Combination of Rubbers with Plastics and Synthetic Resins)*. Moscow: Khimiya; 1972. 224 p. (in Russ.).
4. Chernyshov S.V., Lyusova L.R., Makhmudova S.R., Zharylganova M.B., Konyaeva L.A. The effect of high-density polyethylene on the properties of elastomeric materials made of synthetic polyisoprene. *Kauchuk i Rezina*. 2023;82(5): 242–247 (in Russ.). <https://doi.org/10.47664/0022-9466-2023-82-5-242-247>
5. Semenova S.N., Chaykun A.M., Suleymanov R.R. Ethylene-propylene-diene rubber and its use in rubber materials for special purposes. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*. 2019;56(3):23–30 (in Russ.). <http://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-3-23-30>
6. Lee S.-H., Park G.-W., Kim H.-J., Chung K., Jang K.-S. Effects of Filler Functionalization on Filler-Embedded Natural Rubber/Ethylene-Propylene-Diene Monomer Composites. *Polymers*. 2022;14(17):3502. <https://doi.org/10.3390/polym14173502>
7. Kablov E.N., Semenova S.N., Suleymanov R.R., Chaykun A.M. Prospects for the use of ethylene-propylene-diene rubber as part of cold resistant rubber. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*. 2019;84(12):29–36 (in Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-12-29-36>
8. Eliseev O.A., Chaykun A.M., Buznik V.M., Sokolova M.D., Popov S.N. The basic principles of creation of formula cold-resistant rubbers stock for the products maintained in the conditions of the Arctic climate. *Perspektivnye Materialy*. 2015;11:5–18 (in Russ.).
9. Valueva M.I., Zhelezina G.F., Gulyaev I.N. Increased wear-resistance polymer composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik = All Materials. Encyclopedic Reference Manual*. 2017;6:23–29 (in Russ.).
10. Samad M.A. Recent Advances in UHMWPE/UHMWPE Nanocomposite/UHMWPE Hybrid Nanocomposite Polymer Coatings for Tribological Applications: A Comprehensive Review. *Polymers*. 2021;13(4):608. <https://doi.org/10.3390/polym13040608>
11. Yue Q., Gao R., Song Z., Gou Q. Recent Advancements in the Synthesis of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene via Late Transition Metal Catalysts. *Polymers*. 2024;16(12):1688. <https://doi.org/10.3390/polym16121688>
12. Yahaya L.E., Adebawale K.O., Olu-Owolabi B.I. Cure characteristics and rheological properties of modified kaolin-natural rubber composites. *Am. Chem. Sci. J.* 2014;4(4): 472–480. <http://doi.org/10.9734/ACSJ/2014/6575>
13. Shadrinov N.V., Borisova A.A., Khaldeeva A.R., Antoev K.P. Influence of the technological mode of mixing and curing system on the properties of compositions based on nitrile rubber and ultra-high molecular weight polyethylene. *Perspektivnye Materialy*. 2023;2:77–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2023-2-77-86>
14. Belokurova A.P., Ageeva T.A. *Khimiya i tekhnologiya polucheniya poliolefinov (Chemistry and Technology for Producing Polyolefins)*. Ivanovo: Ivanovo State University of Chemistry and Technology; 2011. 126 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9616-0399-4
15. Novakov I.A., Vol'fson S.I., Novopol'tseva O.M., Krakshin M.A. *Reologicheskie i vulkanizatsionnye svoistva elastomernykh kompozitsii (Rheological and Vulcanization Properties of Elastomeric Compositions)*. Moscow: Akademkniga; 2006. 332 p. (in Russ.). ISBN 5-94628-296-4

17. Андреева И.Н., Веселовская Е.В., Наливайко Е.И. и др. *Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности*. Л.: Химия; 1982. 80 с.
18. Зуев Ю.С. Стойкость резин к агрессивным воздействиям. Данные последних лет. Часть 2. *Каучук и резина*. 2000;1:36–42.
19. Алифанов Е.В., Чайкун А.М., Венедиктова М.А., Наумов И.С. Особенности рецептур резин на основе этиленпропиленовых каучуков и их применение в изделиях специального назначения. *Авиационные материалы и технологии*. 2015;35(2):51–55. <http://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-2-51-55>
16. López-Manchado M.A., Arroyo M., Herrero B., Biagiotti J. Vulcanization kinetics of natural rubber-organoclay nanocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.* 2003;89(1):1–15. <https://doi.org/10.1002/app.12082>
17. Andreeva I.N., Veselovskaya E.V., Nalivaiko E.I., et al. *Sverkhvysokomolekulyarnyi polietilen vysokoi plotnosti (Ultra-High Molecular Weight Polyethylene)*. Leningrad: Khimiya; 1982. 80 p. (in Russ.).
18. Zuev Yu.S. Resistance of rubber to aggressive influences. Data from recent years. Part 2. *Kauchuk i Rezina*. 2000;1:36–42 (in Russ.).
19. Alifanov E.V., Chaykun A.M., Venediktova M.A., Naumov I.S. Features of rubber formulations based on ethylene-propylene rubbers and their use in special-purpose products. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*. 2015;35(2):51–55 (in Russ.). <http://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-2-51-55>

## Об авторах

**Соколова Марина Дмитриевна**, д.т.н., директор Института проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, обособленное подразделение ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН» (ИПНГ СО РАН) (677007, Россия, Якутск, ул. Петровского, д. 2). E-mail: marsokol@mail.ru. Scopus Author ID 56896257700, ResearcherID A-5266-2014, SPIN-код РИНЦ 7603-7126, <https://orcid.org/0000-0003-2306-5870>

**Халдеева Анна Романовна**, младший научный сотрудник, лаборатория материаловедения, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, обособленное подразделение ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН» (ИПНГ СО РАН) (677021, Россия, Якутск, ул. Автоторожная, д. 20). E-mail: haldeeva-anna@mail.ru. Scopus Author ID 56543791200, ResearcherID F-3304-2017, SPIN-код РИНЦ 9794-1948, <https://orcid.org/0000-0001-5639-3817>

**Давыдова Мария Ларионовна**, к.т.н., ведущий научный сотрудник, лаборатория материаловедения, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, обособленное подразделение ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН» (ИПНГ СО РАН) (677021, Россия, Якутск, ул. Автоторожная, д. 20). E-mail: davmlar@mail.ru. Scopus Author ID 54418553900, ResearcherID A-5434-2017, SPIN-код РИНЦ 9484-7082, <https://orcid.org/0000-0003-2252-2515>

**Федорова Айталина Федоровна**, к.т.н., ведущий научный сотрудник, лаборатория материаловедения, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, обособленное подразделение ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН» (ИПНГ СО РАН) (677021, Россия, Якутск, ул. Автоторожная, д. 20). E-mail: faitalina@mail.ru. Scopus Author ID 15839740800, ResearcherID F-8834-2017, SPIN-код РИНЦ 4814-9708, <https://orcid.org/0000-0001-6763-5746>

**Шадринов Николай Викторович**, к.т.н., и.о. заместителя директора по научной работе Института проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, обособленное подразделение ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН» (ИПНГ СО РАН) (677021, Россия, Якутск, ул. Автоторожная, д. 20). E-mail: nshadrinov@gmail.com. Scopus Author ID 55978832000, Researcher ID A-6417-2014, SPIN-код РИНЦ 9747-4208, <https://orcid.org/0000-0002-2694-9615>

## About the authors

**Marina D. Sokolova**, Dr. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Subdivision of the Federal Research Center “The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” (2, Petrovskogo ul., Yakutsk, 677007, Russia). E-mail: marsokol@mail.ru. Scopus Author ID 56896257700, ResearcherID A-5266-2014, RSCI SPIN-code 7603-7126, <https://orcid.org/0000-0003-2306-5870>

**Anna R. Khaldeeva**, Junior Researcher, Materials Science Laboratory, Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Subdivision of the Federal Research Center “The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” (20, Avtodorozhnaya ul., Yakutsk, 677021, Russia). E-mail: haldeeva-anna@mail.ru. Scopus Author ID 56543791200, ResearcherID F-3304-2017, RSCI SPIN-code 9794-1948, <https://orcid.org/0000-0001-5639-3817>

**Maria L. Davydova**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Materials Science Laboratory, Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Subdivision of the Federal Research Center “The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” (20, Avtodorozhnaya ul., Yakutsk, 677021, Russia). E-mail: davmlar@mail.ru. Scopus Author ID 54418553900, ResearcherID A-5434-2017, RSCI SPIN-code 9484-7082, <https://orcid.org/0000-0003-2252-2515>

**Aitalina F. Fedorova**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Materials Science Laboratory, Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Subdivision of the Federal Research Center “The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” (20, Avtodorozhnaya ul., Yakutsk, 677021, Russia). E-mail: faitalina@mail.ru. Scopus Author ID 15839740800, ResearcherID F-8834-2017, RSCI SPIN-code 4814-9708, <https://orcid.org/0000-0001-6763-5746>

**Nikolay V. Shadrinov**, Cand. Sci. (Eng.), Acting Deputy Director for Scientific Work, Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Subdivision of the Federal Research Center “The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” (20, Avtodorozhnaya ul., Yakutsk, 677021, Russia). E-mail: nshadrinov@gmail.com. Scopus Author ID 55978832000, ResearcherID A-6417-2014, RSCI SPIN-code 9747-4208, <https://orcid.org/0000-0002-2694-9615>